

**К 85-ЛЕТИЮ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ**

УДК 536.46

*А. И. ГОРДИЕНКО, А. И. МИХЛЮК, И. И. ВЕГЕРА*

**НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ  
И ОБОРУДОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: smto@tut.by*

Рассмотрены актуальные направления развития технологий и оборудования индукционного нагрева. Показаны возможности применения математического аппарата для моделирования процессов индукционного нагрева заготовок сложного переменного сечения из высоколегированных сталей. Рассмотрены аспекты разработки современных технологий индукционного нагрева под операции термообработки и деформации металла. Приведено описание конструкции и принципа работы современных автоматизированных комплексов индукционного нагрева.

*Ключевые слова:* индукционный нагрев, моделирование, технологии индукционного нагрева, автоматизированные комплексы.

*A. I. GORDIENKO, A. I. MIKHLYUK, I. I. VIAHERA*

**RECENT TRENDS IN INDUCTION HEATING TECHNOLOGY AND EQUIPMENT**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: smto@tut.by*

Relevant trends in induction heating technology and equipment are analyzed. Capability of application of mathematical tools in simulation of induction heating of high-alloy steel billets with composite variable cross-section is shown. Aspects of development of the modern technology of induction heating with a view to heat treatment and metal straining are examined. Designs and operating principles of modern automated complexes of induction heating are described.

*Keywords:* induction heating, simulation, induction heating technology, automated complexes.

Технологии и автоматизированное индукционное оборудование нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, как металлургическая, автотракторная, машиностроение, станкостроение, производство сельскохозяйственной техники.

Индукционный нагрев является бесконтактным методом нагрева электропроводящих материалов токами высокой частоты (ТВЧ) и используется для термообработки, плавки, сварки, пайки, нагрева под оплавление и деформацию металлов. К достоинствам этого метода можно отнести высокую производительность и энергоэффективность нагрева за счет КПД до 95% [1, 2]. Индукционные установки, применяемые для нагрева металлов под деформацию, по сравнению с газовым печным нагревом позволяют снизить затраты потребления энергоресурсов, уменьшить угар металла, решить проблему брака, связанную с перегревом металла, а также значительно снизить трудоемкость операций вплоть до полной автоматизации процесса. При поверхностной индукционной закалке вместо цементации в печах в сотни раз сокращается длительность процесса, снижаются трудоемкость и стоимость упрочнения, необходимость использования природного газа, минеральных масел, асбеста, жаропрочных и жароупорных материалов, устраняются выбросы в окружающую среду применяемых вредных веществ и продуктов их распада.

Теорией и проектированием установок высокочастотного индукционного нагрева занимались многие известные ученые (Г. И. Бабат, В. П. Вологдин, В. С. Немков, А. Е. Слухоцкий и др.) Впервые индукционное оборудование в Республике Беларусь применили во многих отраслях промышленности в 50-х годах 20 в., когда закладывались основы современного машиностроения республики. Его освоение и внедрение начинали Минский тракторный и Минский автомобильный заводы. На Минском автомобильном заводе первые установки ТВЧ были освоены уже в конце 40-х годов, а в 1982 г. количество деталей, подвергаемых индукционному нагреву на Минском автомобильном заводе, достигло 400 шт., мощность высокочастотного оборудования выросла до 10000 кВт.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси широко применяли нагрев ТВЧ при разработке процессов изготовления деталей методом поперечно-клиновой прокатки, точной штамповки и прессования. Разработаны и используются технологические процессы поверхностного упрочнения защитных бронезащитных элементов, дисков зерноплющилок, пальцев экскаваторов, ниппелей и штанг установок геологоразведочного бурения, ножей кормоуборочной и почвообрабатывающей техники.

В настоящее время на промышленных предприятиях Республики Беларусь используется более 1000 шт. индукционных установок, причем около 70% из них имеют 100%-ный износ. Поэтому перед предприятиями стоит важная задача по модернизации термических и кузнечных производств. Для ее научного и технического сопровождения в Физико-техническом институте НАН Беларуси в 2011г. под руководством академика А. И. Гордиенко создан НИЦ Индукционных технологий и проблем термической обработки. Основные перспективные направления его деятельности:

- моделирование процессов индукционного нагрева и изучение влияния режимов нагрева на структуру и свойства металлов и сплавов;

- разработка энергоэффективных технологий высокочастотной термообработки, нагрева под деформацию, пайку и плавку;

- выработка методических рекомендаций по модернизации действующего оборудования индукционного нагрева;

- разработка и изготовление современных автоматизированных комплексов индукционного нагрева и вспомогательной оснастки (индуктора, станции охлаждения и подготовки закалочной жидкости);

- разработка системы управления индукционным термическим оборудованием и технологическим процессом на базе современных промышленных контроллеров.

**Моделирование процессов индукционного нагрева металлов и сплавов.** Первым этапом при разработке технологий и оборудования индукционного нагрева в современных условиях, на наш взгляд, должно быть моделирование процесса индукционного нагрева конечной детали. Особенностью технологической подготовки производства деталей, подвергаемых индукционному нагреву, является анализ обоснованности назначения режимов их обработки на стадии проектирования. Традиционно анализ осуществляется экспериментальными методами с применением разрушающих методов контроля и металлографии, что связано со значительными затратами времени и материальных средств. Одним из эффективных направлений решения указанных проблем является применение методов компьютерного моделирования, которые при минимальных дорогостоящих экспериментальных исследованиях позволяют получить максимальное количество информации о характеристиках разрабатываемого процесса и свойствах полученных изделий. Мировая тенденция развития данного направления заключается в применении CALS-технологии, т. е. сквозной автоматизации всего жизненного цикла изделия.

Методы математического моделирования позволяют рассматривать различные стадии производства и эксплуатации изделий в режиме реального времени. Поскольку фактически любой процесс, происходящий в окружающем мире, можно описать при помощи математических моделей с той или иной точностью, то, используя современные высокопроизводительные ЭВМ, можно осуществлять прогнозирование поведения изделия как в процессе изготовления, так и в процессе его эксплуатации. Адекватность моделей зависит лишь от точности исследования. Для

обеспечения высокой точности используется множество уравнений и итераций, соответственно требуется больше времени на моделирование.

Математическое моделирование процессов термообработки невозможно без детального изучения и анализа кинетики фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах; теплофизических процессов, происходящих при нагреве; процессов формирования физико-механических и технологических свойств деталей.

Процесс термической обработки металлов можно разделить на следующие этапы: нагрев до определенной температуры, выдержка при данной температуре и охлаждение. На этих этапах происходят следующие теплофизические процессы:

- теплопередача от окружающей среды к металлу;
- распределение тепловой энергии в объеме металла;
- фазовые и структурные превращения, происходящие с выделением или поглощением тепла;
- упругие и пластические деформации, образующиеся вследствие изменения температуры металла и фазовых превращений в нем.

Прогнозирование протекания данных процессов при нагреве, их влияния на получаемые свойства и является задачей моделирования.

В наши дни в области CAE (Computer Aided Engineering)-моделирования теплофизических процессов и устройств находят применение универсальные и специализированные программные средства.

Универсальные программные средства предоставляют возможность моделирования различных физических процессов в одной программной оболочке с их адаптацией к анализу конкретного технологического процесса или конструкции. В свою очередь специализированные программные средства предназначены для моделирования одного или нескольких технологических процессов, близких по физическим основам (например, закалка, литье, штамповка) [3].

Основной результат моделирования – данные о температурных полях, получаемые в детали при нагреве с допустимыми перепадами температур по ее сечению. Уровень перепада температур определяется теплофизическими свойствами материала детали, ее геометрическими размерами, температурой нагрева, подводимой мощностью. Кроме того, перечисленные факторы ограничивают минимальное время нагрева заготовок [4]. Таким образом, время нагрева и передаваемая в деталь величина мощности определяются из условия достижения требуемого распределения температурного поля.

Примером моделирования процесса индукционного нагрева может служить модель поштучного сквозного нагрева стальных поковок трубного простого или сложного сечения типа колец из высоколегированных подшипниковых сталей, созданная в программе Universal 2D. Для определения эффективности и правильного выбора схемы нагрева проведено моделирование режимов нагрева и распределения температурных полей в заготовке при 6-позиционном нагреве заготовок под операцию кольцераскатки до температуры  $(1250 \pm 50)^\circ\text{C}$ . Для моделирования выбрана заготовка роликового подшипника, имеющая геометрические размеры (внешний диаметр в интервале 230–185 мм и высота в интервале 105–75 мм).

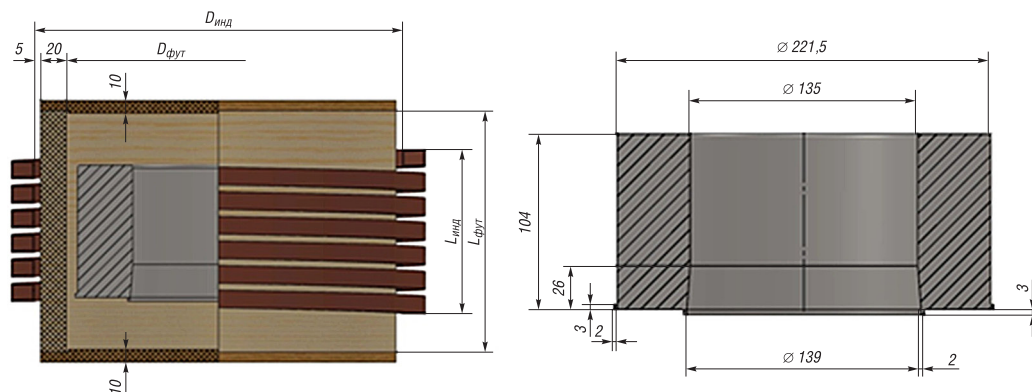


Рис. 1. Общий вид заготовки и ее модели

Общий вид заготовки и ее модели в индукционной катушке показаны на рис. 1. Геометрические параметры индуктора и его футеровки, а также основные параметры технологии нагрева приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Геометрические параметры индуктора и футеровки

Параметр	Величина
Диаметр внутренний по меди ( $D$ ), мм	290
Длина по меди ( $L$ ), мм	130
Количество витков ( $W$ )	6
Диаметр внутренний футеровки ( $D$ ), мм	240
Толщина футеровки, мм	20
Толщина крышек, мм	10
<i>Начальные данные технологии</i>	
Темп, с	50
Количество индукторов	6
Количество источников питания	3
Расстояние между осями индукторов, мм	430
Температура воздуха, °C	20

П р и м е ч а н и е. Материал футеровки – шамот. Тип подключения индукторов – последовательное подключение.

Для определения эффективности нагрева, прежде всего, равномерности распределения температурного поля по сечению заготовки выбраны четыре характерные точки, по которым выстраивалась общая картина нагрева заготовки:  $T1$ ,  $T2$  – температуры в центральной зоне соответственно на внешней и внутренней поверхностях заготовки;  $T3$ ,  $T4$  – температуры в торцевой зоне соответственно на внешней и внутренней поверхностях заготовки.

Т а б л и ц а 2. Электрические параметры установки

Параметр	Номинальные параметры источников питания					
	Номер источника питания					
	1	2	3	4	5	6
$P$ , кВт	420	180	160			
$f$ , кГц	7					
$I$ , А	2020	2000	2260			
Параметр	Расчетные электрические параметры					
	Номер индуктора					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{макс}}$ , кВт	290	120	47	47	41	41
$P_{\text{реакт}}$ , кВ·А	1500	1300	600	600	520	520
$I$ , А	2000		1340		1250	
$U$ , В	760	670	450	450	420	420
КПД эл.	0,88–0,7	0,7	0,71	0,71	0,71	0,71
Температура, °C	Параметры нагрева					
	Номер индуктора					
	1	2	3	4	5	6
<i>Температура в центральной зоне заготовки после каждого индуктора</i>						
$T1$	865	1090	1040	1110	1165	1230
$T2$	315	570	720	850	970	1050
<i>Температура в торцевой зоне заготовки после каждого индуктора</i>						
$T3$	1000	1250	1100	1160	1200	1250
$T4$	315	570	715	830	930	1000

Для расчета использовались электрические параметры индукционной установки и режимы нагрева (табл. 2). В результате моделирования (табл. 2, рис. 2–4) установлено, что предложенная схема с 6 позициями нагрева не обеспечивает равномерности распределения температуры заготовки по сечению в пределах  $\pm 50$  °С. При такой схеме нагрева градиент температур по сечению заготовки достигает 250 °С после последней 6-й позиции нагрева. Оптимальным решением в данной ситуации является обеспечение выдержки нагретой заготовки с регулируемыми скоростями охлаждения для выравнивания ее температуры по сечению. Для этого в установке должна быть предусмотрена дополнительная позиция термостатирования, расположенная после позиции окончательного нагрева в 6-м индукторе.

Данное решение позволяет выровнять температуру по сечению заготовки без снижения производительности оборудования и обеспечить конечную равномерность распределения температуры по сечению в пределах  $\pm 50$  °С (рис. 5).

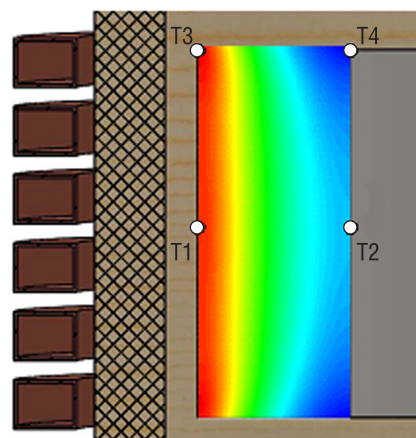


Рис. 2. Распределение температурного поля заготовки после 6-го индуктора

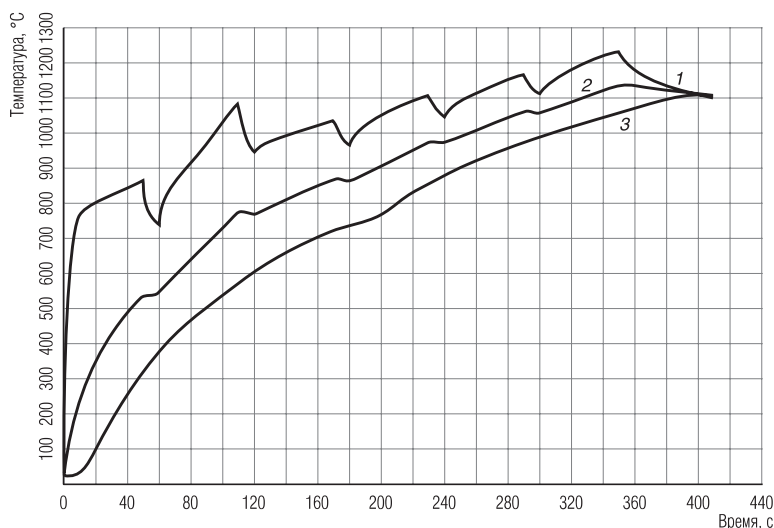


Рис. 3. Изменение температуры заготовки в среднем сечении: 1 – температура на поверхности, 2 – средняя температура, 3 – температура в центре

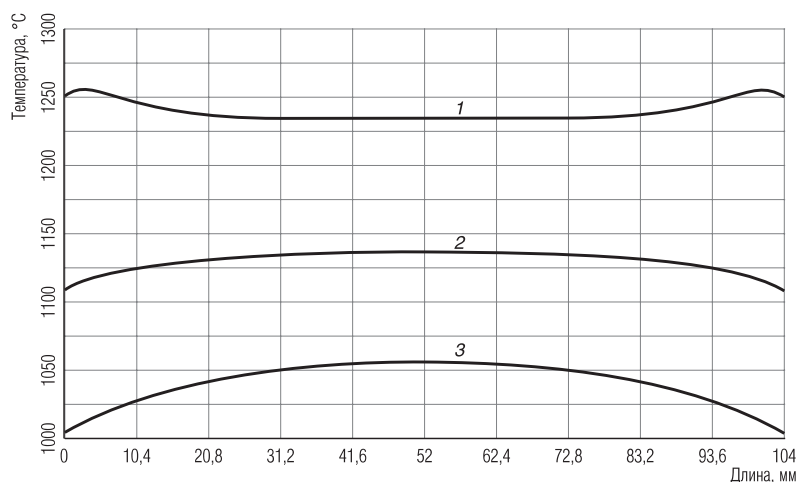


Рис. 4. Распределение температуры вдоль заготовки после 6-го индуктора: 1 – температура на поверхности, 2 – средняя температура, 3 – температура в центре



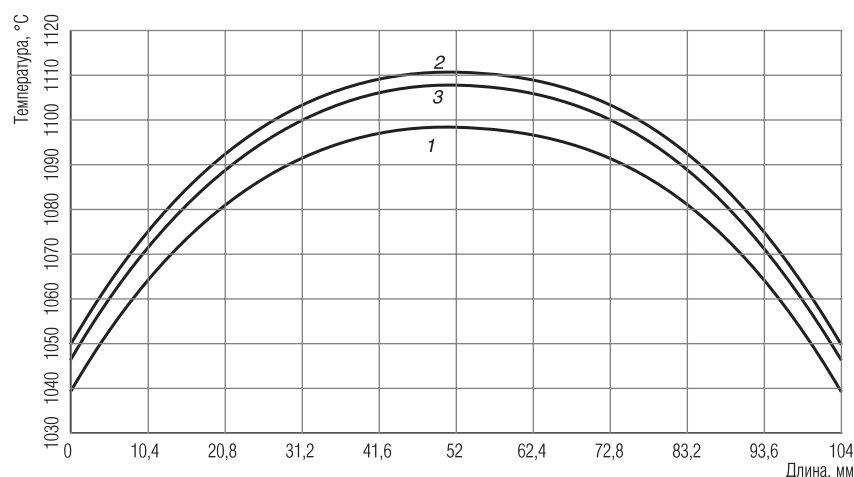


Рис. 5. Распределения температуры вдоль заготовки после 60 с выдержки в термостате: 1–3 см. на рис. 3

Результаты моделирования процесса нагрева заготовок колец подшипников позволили на стадии проектирования индукционного комплекса предусмотреть необходимое количество позиций нагрева и термостатирования заготовки, рассчитать мощность и частоту источников питания, время нагрева и выдержки заготовки.

**Разработка энергоэффективных технологий высокочастотной термообработки, нагрева под деформацию, пайку и плавку.** Не менее важной задачей является разработка новых перспективных технологий индукционного нагрева различных деталей и заготовок. Развитие машиностроения связано с разработкой высокоэффективных процессов упрочнения деталей машин, терпящих износ, изгиб, удар и высокие контактные нагрузки. В настоящее время для этих целей используют методы термической и химико-термической обработки. Каждый из них обладает определенными достоинствами и недостатками. Наибольшее распространение в промышленности получил метод термического упрочнения с использованием нагрева в камерных, шахтных и других печах. Он надежный, стабильный, универсальный и широко применяется на предприятиях машиностроения. Основной недостаток – низкий КПД, связанный со значительными энергозатратами на разогрев печей. В этой связи поверхностная термообработка с применением высокочастотного нагрева является весьма перспективным методом для большинства деталей. Она позволяет получать на конструкционных сталях поверхностно-упрочненные слои толщиной до 10 мм, обладающие высокими твердостью и износостойкостью. Использование высокочастотного нагрева резко снижает энергозатраты вследствие уникальной возможности локального упрочнения рабочих поверхностей, уменьшает или полностью исключает обезуглероживание и окисление. Однако применение данного метода ограничено для обработки деталей, изготовленных из легированных сталей или имеющих сложную геометрическую форму с концентраторами напряжений в виде шлицов, шпонок, острых кромок и т. д. В этом случае при высокочастотной поверхностной обработке необходимо проведение большого комплекса научно-исследовательских работ, направленных на обоснованный выбор марок стали, режимов нагрева и охлаждения, разработку и испытание нагревательных и охлаждающих устройств, а также исследование структуры и свойств упрочненных деталей.

**Выработка методических рекомендаций по модернизации действующего оборудования индукционного нагрева.** Модернизация существующего индукционного оборудования может быть реализована с помощью замены только преобразователя частоты в действующей установке на более экономичный и производительный генератор, полной замены преобразователя частоты, нагревательного блока, коммутирующих сетей, комплекта индукторов и корректировки технологий.

При первом варианте модернизации происходит замена только источника высокой частоты, т. е. физически изношенного машинного генератора с КПД 60–75 % на полупроводниковый преобразователь нового поколения на транзисторных или тиристорных модулях, имеющий КПД 95–97 %. При этом полупроводниковый преобразователь устанавливается вместо машинного генератора,

что позволяет сохранить подводимые коммуникации, устройство нагревательного блока, комплект индукторов и действующую технологию при определенных подстройках режимов. При этом необходимо учесть, что при определении технических требований на замену источника высокой частоты соблюдается следующее правило: замена преобразователя частоты в действующей установке будет наиболее эффективной при учете размеров выходных параметров. Например, при замене машинного преобразователя на тиристорный или транзисторный генератор следует соблюдать такие выходные параметры, как величина выходного номинального напряжения, интервал его регулирования, рабочая частота.

Основной экономический эффект при замене преобразователей частоты достигается за счет экономии энергоресурсов. Большинство технологий индукционной термообработки (в первую очередь, закалка с применением индукционного нагрева) предполагает циклический режим работы преобразователя при постоянном режиме работы индукционного оборудования. Следовательно, преобразователь работает в режиме «нагрузка – холостой ход», индукционное оборудование (станок, линия) – в цикле «нагрузка». Преобразователь отдает полезную мощность только на этапе нагрева детали под закалку, на остальных стадиях технологического цикла он работает на холостом ходу и его мощность не является полезной. В машинных генераторах значение тока холостого хода достигает 25–30% от величины тока при номинальной мощности за счет наличия в конструкции генератора мощного двигателя. В полупроводниковом преобразователе двигатель в конструкции отсутствует, ток холостого хода не превышает 1%. За счет этого и более высокого КПД генератора достигается основная экономия электроэнергии.

В случае полной модернизации оборудования происходит замена источника высокой частоты, который встраивается в действующую индукционную установку или устанавливается рядом с ней. Нагревательный блок установки в составе закалочного трансформатора и батареи конденсаторов меняется на новый трансформаторно-конденсаторный блок, работающий в паре с полупроводниковым преобразователем. При мощностях до 160 кВт преобразователь и трансформаторный блок устанавливаются в едином корпусе. В результате глубокой модернизации полностью изменяется конфигурация всей установки, прокладываются новые коммуникации, происходит ревизия действующей технологии и комплекта индукторов. Преимуществами данного решения являются экономия энергоресурсов по аналогии с первым вариантом, производственных площадей, расширение диапазонов регулировок параметрами преобразователя по мощности и частоте, возможность полной автоматизации технологического процесса термообработки с записью в контроллер программ для каждой детали.

**Разработка и изготовление современных автоматизированных комплексов индукционного нагрева.** Основными производителями индукционного оборудования в настоящее время являются предприятия России, Китая, Индии и США. Общая закономерность, характерная для всех предприятий, – расширение номенклатуры выпускаемого оборудования и перечня предлагаемых услуг. Если ранее предприятия специализировались на выпуске определенных типов преобразователей частоты, то в настоящее время каждое из них кроме источников предлагает нагревательные устройства определенного назначения и системы автоматизации. В странах ЕС и США производители индукционного оборудования выпускают в основном специализированные комплексы для конкретных производственных задач. Современные комплексы индукционного оборудования, выпускаемые промышленностью, обычно включают в себя преобразователь частоты на полупроводниковой основе; нагревательную установку с полной автоматизацией загрузки и выгрузки деталей; программируемый блок системы управления и контроля как за характеристиками оборудования, так и за технологическим процессом обработки; автономную станцию охлаждения и подготовки закалочной жидкости.

Вариантом такого оборудования может служить автоматизированный индукционный комплекс для нагрева колец подшипников, разработанный в Физико-техническом институте НАН Беларуси для ОАО «Минский подшипниковый завод» (рис. 6.).

Комплекс состоит из следующих основных узлов и механизмов:

1. Опрокидыватель предназначен для установки тары и проведения операции разгрузки заготовок на позицию ворошителя.

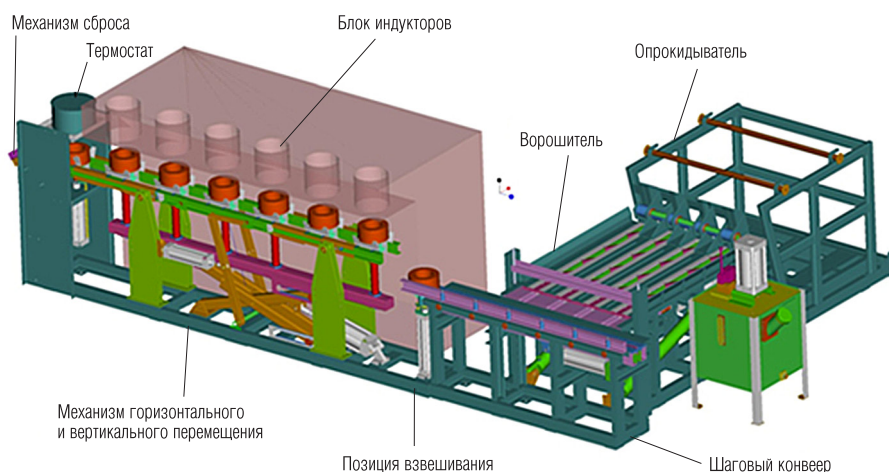


Рис. 6. Модель комплекса нагрева колец подшипников

2. Ворошитель выполнен в виде горизонтальной площадки, на которую выгружаются заготовки из тары. В пазах дна ворошителя установлены фигурные кронштейны, расположенные в несколько рядов. Каждый их ряд совершает движение вперед-назад, т. е. выполняет операцию разборки, ориентации и поштучной подачи хаотично расположенных поковок на позицию шагового конвейера.

3. Шаговый конвейер предназначен для методического перемещения поковок на позицию взвешивания.

4. Позиция взвешивания предназначена для отбраковки заготовок по массе и подачи годных на позиции нагрева.

5. Механизм вертикального и горизонтального перемещения предназначен для пошаговой подачи заготовок на 6 позиций нагрева.

6. Позиции нагрева представляют собой несколько секций индукторов, смонтированных на одной раме, каждая из которых имеет теплоизоляцию в виде керамики. Секции запитаны следующим образом: от полупроводникового генератора ТВЧ мощностью 420 кВт (1-я и 2-я); 180 кВт (3-я и 4-я); 160 кВт (5-я и 6-я).

Температура нагрева поковок на 2, 4 и 6-й позициях контролируется пирометром. При отклонении от заданной температуры подается сигнал на систему управления для увеличения или уменьшения подаваемой мощности в индуктор.

7. Термостат предназначен для изотермической выдержки нагретых заготовок с целью выравнивания температуры по сечению.

8. Механизм сброса обеспечивает перемещение нагретой заготовки на рабочее место раскатчика. Позиция совмещена с механизмом разбраковки заготовок по температуре нагрева.

**Разработка системы управления индукционным термическим оборудованием и технологическим процессом на базе современных промышленных контроллеров.** Повышение требований к качеству индукционного нагрева деталей приводит к существенному усложнению технологического процесса. Поэтому на современном этапе развитие оборудования индукционного нагрева идет по пути совершенствования и автоматизации технологий его применения, опираясь на достижения вычислительной техники.

Комплексы индукционного нагрева должны иметь микропроцессорный программируемый блок системы управления и контроля. При создании данных систем используются следующие технологии V-технологического уклада: информационно-коммуникационные технологии и разработка программного обеспечения; микроэлектроника и радиоэлектронная промышленность; роботостроение, приборостроение и вычислительная техника.

В настоящее время системы управления, установленные на действующем в промышленности оборудовании, реализованы в основном по устаревшим релейным схемам, которые не удов-



летворяют необходимым требованиям нагрева деталей. Разработка современных автоматизированных систем управления подразумевает создание программируемого комплекса, который позволит осуществлять управление процессами нагрева и перемещения детали. Он должен иметь гибкую настройку изменения параметров для обеспечения возможности реализации различных режимов работы оборудования, осуществлять высокоточный контроль параметров его работы. Органы визуализации и управления комплекса должны иметь хорошую эргономичность для удобства работы и обслуживания оборудования оператором.

Система управления должна реализовать основные режимы работы комплекса (ручной, автоматический и режим наладки). Данные режимы должны иметь возможность ввода и регулирования основных параметров процесса нагрева, таких как точки начала работы, нагрева, охлаждения; окончания нагрева охлаждения; время нагрева и охлаждения; автовозврат в точку начала работы; скорость перемещения заготовки; скорость вращения заготовки. Система управления должна поддерживать возможность задания скорости перемещения и вращения детали в разных единицах. Система управления должна отслеживать текущее положение детали, всех параметров нагрева и контролируемого охлаждения, что реализуется в виде обратной связи с записью и сохранением данных на USB-носитель для последующих анализа и обработки.

Таким образом, в данной статье рассмотрены основные направления развития технологий и оборудования индукционного нагрева, которые в ближайшие годы будут актуальными как с научной, так и с производственной точки зрения.

### **Список использованной литературы**

1. Актуальные проблемы прочности / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: Из-во УО ВГТУ, 2010. – Гл. 1: Перспективы развития оборудования и технологий индукционного нагрева в Республике Беларусь. – С. 5–42.
2. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А. И. Гордиенко [и др.]. – Минск: Белорусская наука, 2009.
3. Компьютерное моделирование технологических систем: учеб. пособие: в 2 ч. / С. П. Кундас [и др.]. – Минск: БГУИР, 2003. – Ч. 2.
4. Безручко, И. И. Индукционный нагрев для объемной штамповки / И. И. Безручко. – Л.: Машиностроение, 1987.

*Поступила в редакцию 20.11.2015*